

湖南省典型稀有金属矿床地球物理响应特征 及物探找矿方法研究

曹创华^{1,2,3,4}, 文春华², 楼法生¹, 孟德保²,
刘春明^{3,4}, 康方平², 彭 杰²

(1.江西省地质调查研究院, 江西 南昌 330030; 2.湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410116; 3.中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 4.中南大学 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 为探索湖南省花岗岩型和伟晶岩型稀有金属找矿中的有效物探方法及其组合应用效果, 针对地球物理方法在我国找矿现状及成果, 利用高精度磁测、激发极化法、音频电磁测深和氡气放射性探测等手段进行了方法有效性试验。通过前期调研选择了以伟晶岩型稀有金属矿床为代表的湘东北连云山地区白沙窝铌钽多金属矿和以花岗岩型稀有金属矿床为代表的湘南尖峰岭钨多金属矿为两个试验区, 根据地质条件设计并完成了野外探测, 据此进行地球物理重、磁、电和放射性的地球物理响应评价。结合地表调查结果分别建立了地质地球物理找矿标志, 并进行深部隐伏矿预测, 钻探验证效果良好。稀有金属矿床有效的地球物理勘查方法技术组合, 可为服务于湖南省(或具有类似成矿条件的其他地区)稀有金属矿床找矿工作提供借鉴。

关键词: 湘东北地区; 湘南地区; 稀有金属矿床; 地球物理探测方法

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2020)06-1096-017

0 引 言

自 2011 年国家财政部和自然资源部将“三稀(稀土、稀有金属和稀散)资源”作为国家重点战略性资源调查对象以来, 科技部、自然资源部和四川、湖南和陕西等省份管理机构设立了一系列科研和基础地质调查项目的摸底工作, 取得了一系列新的成果和认识(王登红等, 2013, 2016; Wang et al., 2018; Guo et al., 2018)。稀有金属主要包括锂、铌、钽、铷等 9 种, 在四川西部、湖南等省份均有所发现, 且成矿前

景良好, 其中四川甲基卡锂辉石矿是目前亚洲发现最大的稀有金属矿区(中国矿床发现史, 1996)。按照稀有金属矿床成因来分, 我国以内生型的碱性岩型、花岗岩型和伟晶岩型为主(袁忠信和白鸽, 2001; 张玲和林德松, 2004), 就目前发现的稀有金属矿床而言, 碱性岩型主要分布在内蒙古的白云鄂博、四川牦牛坪-茨达和湖北庙垭等地, 花岗岩型主要分布在华南地区(特别是南岭及其邻区), 伟晶岩型主要分布在四川康定甲基卡等地(Xu et al., 2019)。

经过多年研究, 稀有金属矿床科研成果丰硕。

收稿日期: 2018-12-27; 改回日期: 2019-07-17

项目资助: 湖南省重点领域研发计划“湖南省铌钽铍等稀有金属资源高效勘查与开发”(2019SK2261)、国家重点研发计划“深地资源勘查开采重点专项”(2017YFC0602402)、中国地质调查局项目“湖南重点矿集区稀有金属调查评价”(DD20160056)和湖南省创新型省份建设专项科普专题“探寻三稀矿产的奥秘”(2020ZK4081)联合资助。

第一作者简介: 曹创华(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地球物理勘查技术研究、项目管理等工作。Email: 0404050825@163.com

黄定堂(2003)通过对江西灵山岩体研究认为稀有金属的成矿空间在岩体顶部和边缘,花岗岩型或者伟晶岩型矿床的稀有金属成矿是伴随着热液活动蚀变等成矿过程而富集,以黄玉化、萤石化和部分黄铁矿化为找矿标志。张玲和梁磊(2018)以广西栗木稀有金属矿为例,证实了华南重大地质事件中的花岗岩型稀有金属成矿空间往往分布在岩体的顶部和中上部,具有“似伟晶岩壳”,岩体内部具似层状分布的特征,且顶部存在热液蚀变。刘怀胜(2018)分析了新疆可可托海以及波孜果尔等矿床的分布特征,并结合地表调查,证实伟晶岩型稀有金属矿与主要含石英脉和安山岩碎裂带有关,得出找矿标志上存在强硅化、黄铁矿化、绿泥石化等特征,部分矿点还存在铅锌矿化等结论。

湖南省有色金属矿众多(湖南省地质调查院, 2017),特别是中生代以来的印支、燕山等地质运动造就了湘东北幕阜山、湘南香花岭、湘中南九嶷山等岩体抬升,稀有金属矿床分布广泛。目前发现的稀有金属成矿带在湖南境内可以分为湘东北地区 and 湘南地区(文春华等, 2018)。冷双梁等(2018)通过 15 个岩体内伟晶岩脉带研究,总结了幕阜山地区稀有金属成矿空间规律,认为成矿围岩为板溪群等老地层板岩中的伟晶岩脉,板理薄弱面提供成矿空间,一般情况下矿化集中于岩体顶部特别是凸起处,岩体缓倾斜边部(特别是拐弯等死角处)也有矿体富集,但在岩体内部骤然减弱;针对南岭成矿带,文春华等(2017)进行了尖峰岭矿区花岗岩的地球化学特征研究,认为与成矿作用相关的钠长石花岗岩属岩浆成因,且尖峰岭稀有金属矿体分布于岩体的顶部,矿体以尖峰岭为中心向四周侧伏。

针对稀有金属矿床的找矿技术手段,地球物理技术具有不可或缺的作用。胡忠德(2008)发现可可托海 3 号脉中的伟晶岩脉呈现的高磁异常特征与斜长角闪岩中的磁铁矿化有关。姚锦其和赵友方(2009)利用氦气探测技术在广西栗木锡铌钽矿外围进行了探测试验,认为氦气探测对断裂的反应明显,且与成矿相关的构造表现出氦气异常强度高、范围大,而不含矿构造的氦气异常值较低,且表现出单点跳变异常。付小方等(2014)在川西甲基卡稀有金属矿集区利用 1:5000 网度进行了激电中间梯度法扫面工作,认为高视电阻率物探异常带与地球化学组合异常对应较好,且探地雷达法能较好的分辨浅层隐伏岩体顶界面。李应清(2017)在新疆阿勒泰布勒格矿床运用物探方法找矿,认为伟晶岩型稀有矿床物探异

常具有高阻、低极化等特征,若较大规模的伟晶岩与围岩接触存在磁铁矿化、硫化物时,物探异常则表现出中高阻、高极化等特征。

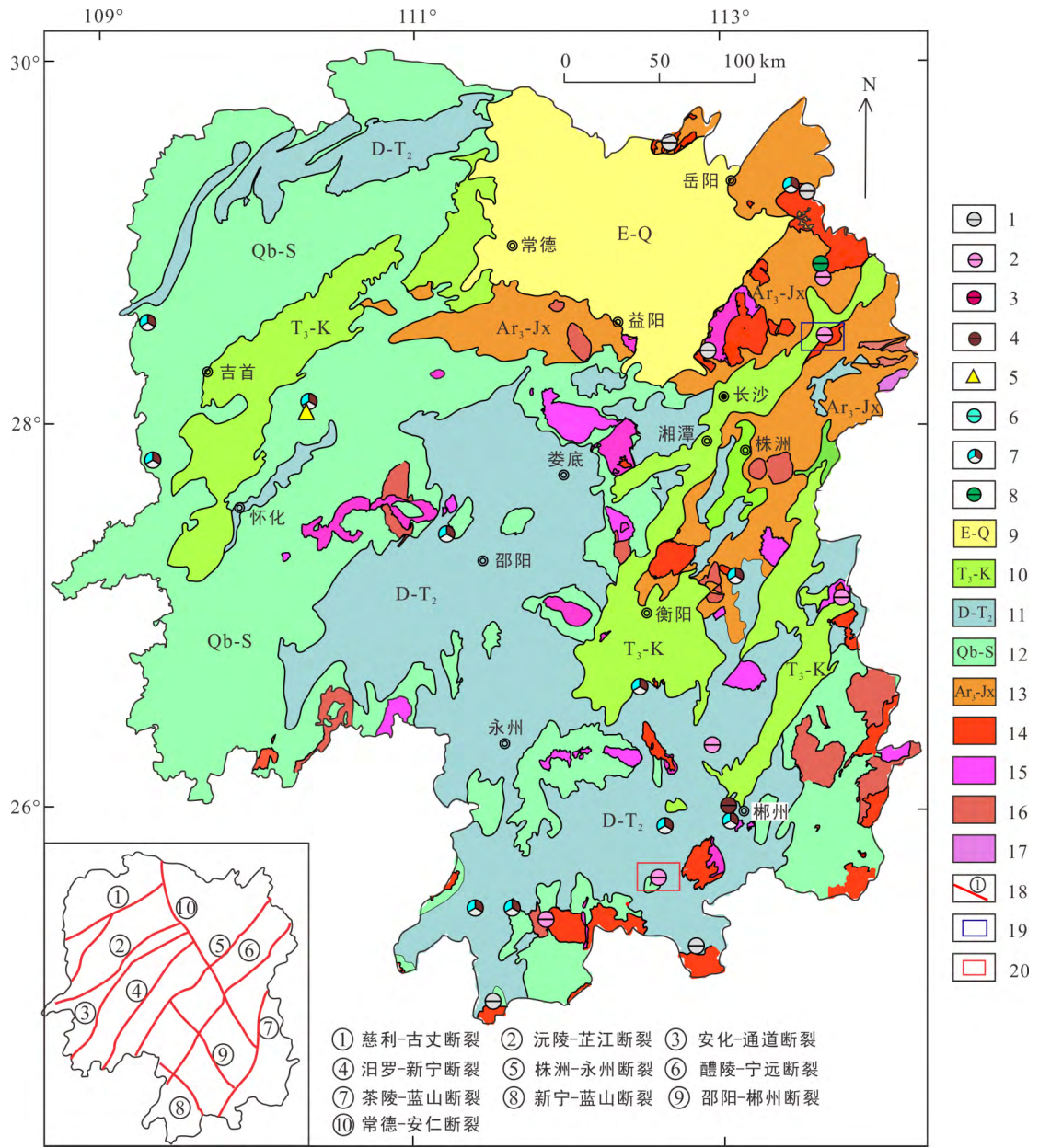
随着稀有金属国家战略性勘查概念的提出,稀有金属矿床的成矿模式、物质来源和找矿方法技术的研究也逐步深入,但较多的都侧重于点上的工作,系统性的研究成果目前较少,以省域作为整体的研究相对缺乏,方法的系统总结稍显欠缺,地球物理方法的利用不够系统。本文将以湘东北和湘南两大稀有金属成矿类型的典型矿床为例,在充分调研地球物理方法在湖南省找矿现状及成果基础上,利用区域重力成果,在野外进行了高精度磁测、中间梯度激发极化法、电磁测深和氦气放射性探测等方法手段有效性试验。针对物探组合异常建议钻孔位置并验证结果良好,最后结合区域认识提出了湖南省潜在稀有金属基地远景区。

1 湖南省稀有金属分布特征

湖南的稀有、稀散金属矿产主要分布在湘东北和湘东南地区(图 1)。全省 39 处稀有、稀散金属矿床中,其中 32 处与岩浆岩有关,岩浆岩岩性主要为花岗岩,次为花岗闪长岩,岩体的时代大部分为侏罗纪,次为白垩纪,个别为三叠纪和志留纪(文春华等, 2018a)。稀有、稀土金属主要与二长花岗岩关系密切,岩体产状多为大岩基,稀散金属主要与闪长岩关系密切,岩体产状多为小岩株。其中稀有金属主要与花岗伟晶岩和二长花岗岩密切相关,稀散金属元素主要伴生在铅锌矿床中。

全省稀有金属矿主要分布在湘东北幕阜山-连云山地区,以及湘南的南岭成矿带,稀有金属矿共有 22 处,已查明 333 及以上级别稀有资源储量 64.21 万吨(其中稀有金属矿物量 3.77 万吨,稀有金属氧化物 60.43 万吨)。22 处稀有金属矿中 10 处为独立稀有矿,4 处为稀有金属和稀土共生矿,涉及除 Sr 之外的其他 8 种稀有金属(文春华等, 2018b)。

稀散金属矿产主要集中分布在在衡东东岗山-常宁水口山-桂阳宝山-江永铜山岭一带,受北东向构造岩浆岩带控制,成矿与中酸性的小岩株关系密切,主要与铅锌矿伴生,占总量的 84%。湖南省稀散金属矿有 19 处,已查明 333 及以上级别稀散金属资源储量 2.95 万吨,全部为伴生矿,其中与铅锌矿伴生的 16 处,与钨、锡、硫矿伴生的 3 处,涉及全部 8 种稀散金属。



1. 独立稀土金属矿; 2. 独立稀有金属矿; 3. 钨伴生稀散金属矿; 4. 锡伴生稀散金属矿; 5. 硫伴生稀散金属矿; 6. 钨伴生稀有金属矿; 7. 铅锌伴生稀散金属矿; 8. 稀有稀土金属矿; 9. 古近系-第四系; 10. 上三叠统-白垩系; 11. 泥盆系-中三叠统; 12. 青白口系-志留系; 13. 新太古界-蓟县系; 14. 燕山期岩浆岩; 15. 印支期岩浆岩; 16. 加里东期岩浆岩; 17. 武陵雪峰期岩浆岩; 18. 区域深大断裂; 19. 湘东北试验区; 20. 湘南试验区。

图 1 湖南省稀有矿产资源分布图(据湖南省地质调查院, 2017)
Fig.1 Distribution of rare metal resources in Hunan province

1.1 区域地层与三稀矿产资源关系

元古界冷家溪群和板溪群主要分布在湘东北幕阜山一带, 地层普遍遭受浅变质作用, 且构造裂隙十分发育, 是稀有元素花岗伟晶岩型矿床的主要围岩(湖南省地质调查院, 2017)。

下古生界地层岩性以砂、板岩及页岩为主, 往往封闭条件较好, 成为花岗岩型稀有、稀土矿床的成矿围岩; 在裂隙发育地区, 常常为晚期稀有元素

成矿热液提供导矿和容矿场所, 形成与钨、锡等伴生的热液脉型矿床。

上古生界在湘东南地区, 其灰岩和白云质灰岩与燕山期含矿花岗岩接触则往往形成矽卡岩型稀有金属矿床。

1.2 区域构造与三稀矿产资源关系

湖南省的 7 条 NE、NNE 向主干大断裂(图 1), 不仅是控岩、控相构造和导矿构造, 而且其旁侧的次

级低序列的NW向、NE向断裂裂隙系统, 往往是储矿容矿构造, 常常成为伟晶岩型稀有金属铌钽矿脉的储矿空间。特别是燕山运动以来的构造和新华夏系构造对稀有、稀土元素成矿起着重要的控制作用。

1.3 花岗岩与三稀矿产资源关系

湖南是我国重要的有色、稀有金属成矿区, 这些金属矿产在时间上、空间上和成因上与花岗岩类密切相关, 但本区各时代花岗岩的有关金属矿产种类和矿化强度则有很大的差别。加里东期及其以前的花岗岩与金矿化、锡矿化、稀土元素矿化有关, 已知有与雪峰期和加里东期花岗岩有关的脉金矿、砂金矿和工业锡矿床。与海西-印支期花岗岩有关的矿床也不多, 目前已知的有锡、稀土元素等。燕山期是湖南成矿作用的高潮期, 与燕山期花岗岩有关的金属矿产种类众多, 矿化也强, 湖南地区许多大、中型矿床均产于此期。

2 典型稀有金属矿床地球物理响应特征

为探索湖南省两大类稀有金属矿床的地球物理方法技术有效性及其规律, 经过野外地质考察, 结合前期地质考察和工作实施环境, 确定了地球物理方法试验区。其中伟晶岩型稀有金属矿床试验区选定在湘东北连云山背斜南翼的白沙窝矿区; 花岗岩型稀有金属矿床试验区选定在湘南临武县城北 15 km 的香花岭东侧尖峰岭附近(图 1)。分别在两个试验区进行了已有重力数据再处理和解释, 激电参数、高精度磁测参数、氦气参数和电磁测深为现场探测。根据试验区地形地貌条件, 在合适的地段包括背景场前提下, 分别在湖南南北两个试验区各选定了一条剖面进行重、磁、电性响应规律评价, 本次探测点距均为 20 m。

2.1 地球物理探测方法

2.1.1 双频激电法

激电参数利用中南大学何继善院士发明的双频激电仪进行测量(何继善, 2006)。装置选择为中间梯度法, 中间梯度法是以 A、B 为供电电极, M、N 为测量电极, 探测记录点为 MN 的中点。双频激电仪测量时选择的频组为 2 组, 分别是高频 4 Hz 和低频 4/13 Hz(Iraj and Tang, 2004), 取 MN=40 m, 两个连续测点之间的测量距离为 20 m, 激电参数选择视幅

频率和视电阻率。处理数据时进行平面剖面图或者平面等值线图绘制。

2.1.2 高精度磁测

高精度磁测参数的获取以北京地质仪器厂生产的 CZM-3 型质子磁力仪进行探测。其野外工作较为简单, 在经过噪声测量、一致性测定、基点选择、 T_0 值的测定和日变观等步骤后, 进行单点探测。处理数据时经过日变改正、正常场改正(梯度改正)、温度改正和零点改正, 然后绘制 ΔT 平面剖面图或者平面等值线图。

2.1.3 氦气探测

氦气参数的获取利用湖北方圆环保科技有限公司生产的最新 FYCDY 型便携式测氦仪进行探测。野外工作为单点测量, 测量原理为放射性元素在断层破碎带或者成矿、储水空间产生运移而出现氦浓度升高(Murtazaev et al., 1997), 通过测氦仪器进行充气、放气等过程进行测量。

2.1.4 音频大地电磁探测

音频大地电磁测深是利用地球内部和外部天然电磁场的信息采集, 进而利用电场和磁场的值进行一定计算和反演来探测地球内部岩石(地层)电性结构的方法(Cagniard, 1953; Lee et al., 2009)。本次采用美国产 KMS-820 型大地电磁仪, 磁探头选择 LEMI118 型, 通过采集两个方向的电道和两个方向的磁道场值, 按照低频反应深部地层信息、高频率反应浅部地层信息进行数据采集, 采集数据频点范围为 1~70000 Hz。

2.2 伟晶岩型典型矿床——湘东北连云山白沙窝矿区

2.2.1 地质特征

工作区(图 2)内主要为青白口系冷家溪群, 具体可划分为: 雷神庙组、黄浒洞组和小木坪组(文春华等, 2018b)。

雷神庙组: 为一套深-半深海相黏土岩夹陆源碎屑浊积岩, 岩性为一套灰色、青灰色中-厚层条带状粉砂质板岩为主夹少量白云质粉砂质板岩与浅灰白色、灰紫色中层状浅变质含凝灰质细砂岩、凝灰质板岩。

黄浒洞组: 与下伏雷神庙组呈整合接触, 系一套陆源碎屑浊沉积岩系, 岩性为灰绿色中厚层状、块状细中粒岩屑石英杂砂岩、岩屑杂砂岩与中厚层状条带板岩、粉砂质板岩构成旋回式韵律层系。

小木坪组: 整合于黄浒洞组之上, 岩性以灰色条带状粉砂质板岩与绢云母板岩互层为主, 间夹少量薄-中层状变质砂质粉砂岩、泥质粉砂岩。

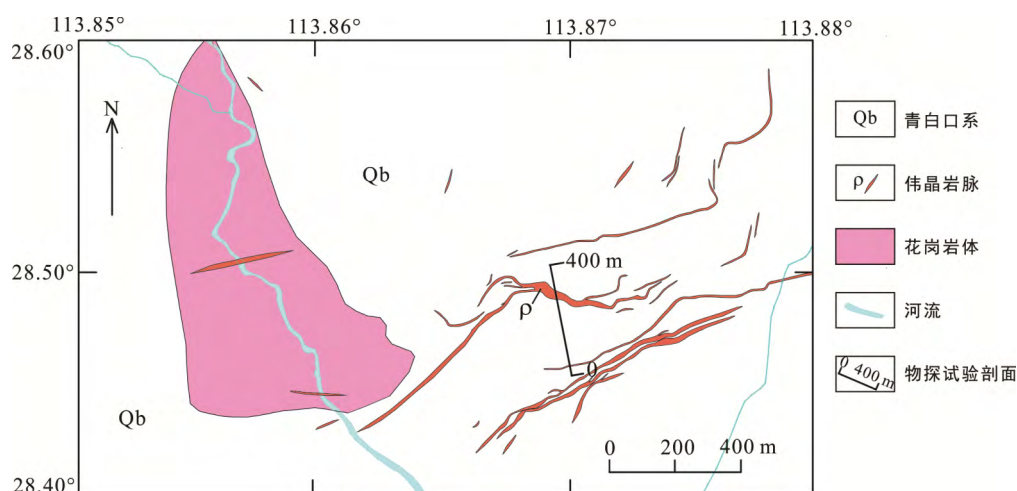


图 2 湘东北试验区地质简图及试验剖面示意图

Fig.2 Geological sketch map of the northeastern Hunan province showing the location of the measured section

2.2.2 矿体特征

白沙窝地区是连云山伟晶岩密集区, 伟晶岩主要分布在白沙窝岩体的张裂隙中及岩体周边, 伟晶岩脉走向近东西, 地表可见长度 50~800 m 左右, 伟晶岩见分带现象; 在上石矿段主要以钠长石伟晶岩和锂辉石伟晶岩为特征, 分布在板岩地层中, 多为顺层产出, 伟晶岩脉走向北东, 长度 200~500 m 不等, 伟晶岩不具分带性, 稀有金属矿主要为铌钽铁矿、绿柱石和锂辉石等。

2.2.3 地球物理响应特征

湘东北试验区完成了区域重力资料的再处理, 利用激电中间梯度法、高精度磁测、氦气探测和音频大地电磁测深进行了野外探测试验, 其中重力资料利用的是全省 1:20 万已有成果(Chen et al., 2015), 现场试验各种方法实测剖面的点距均为 20 m, 剖面总长度为 400 m。激电中间梯度法、高精度磁测经过校正等手段处理后进行剖面绘制(Eberle et al., 2012; 曹创华, 2015; An et al., 2018; Ahmad et al., 2018), 音频大地电磁测深利用 TE 模式和 TM 模式联合反演(Farquharson and Oldenburg, 2004; Strack, 2014; 曹创华, 2015), 氦气探测利用背景衬值等方法处理(姚锦其和赵友方, 2009; 陈希泉等, 2011; 沈晓明和罗先熔, 2013)。

布格重力异常(图 3)显示, 连云山岩体沿幕阜山南部的重力弧形分布, 呈相对高重力异常, 根据全国重力调平数据, 此区内的重力值在-50 mgal 左右, 新元古界覆盖于连云山岩体、九峰等岩体之上, 幕阜山和连云山岩体呈哑铃状南北分布, 基于地质调查结果, 重力值相对较低部位指示了隐伏岩体的存

在。笔者认为在哑铃状的中部把手部位以重力低为特征的向斜两翼为稀有金属矿床产出部位。

试验剖面展示的磁、电、氦气探测结果见图 4, 其中高精度磁测结果显示 100 号测点前的 ΔT 值都 >100 nT, 而大于 100 号测点的值随着测点里程的增加而减小, 测点大于 250 号之后的探测数据逐渐趋于稳定(图 4a), 证实产生矿化过程的地层逐渐减少, 隐伏矿产以相对高磁响应特征为找矿标志。以激电中间梯度法在地表所测的响应数据见图 4b 和图 4c, 其中视幅频率指示整条剖面的背景值为 2%, 而 >3.5% 的区间较为宽泛, 在 50~250 号测点都存在(图 4b), 认为有硫化矿物质存在, 且呈带状连续分布, 呈高极化低阻特征。图 4d 指示氦气放射性探测可以有效的判断异常的顶部位置, 且在异常接近地表位置峰值为背景场的 2.5 倍以上, 证实异常目前还在分异活动当中。

音频大地电磁测深剖面(图 5a)显示, 电阻率浅部较低, 通常 <1500 $\Omega \cdot m$, 深部电阻率较大, 最大值 >10000 $\Omega \cdot m$, 两者中间呈过渡形态, 本次圈定异常范围的电阻率为 1500~3700 $\Omega \cdot m$, 为伟晶岩异常带。结合图 3 和图 4, 推断低阻为青白口系云母片岩、高阻推断为连云山岩体深部延伸的岩株或岩体, 在似向斜及岩体顶部推断为伟晶岩目标体。电阻率清晰的分辨出隐伏岩体的顶部及异常目标体的产状(图 5b)。

2.2.4 钻探验证

经过试验剖面的钻孔 WT01, 深部揭露一条隐伏伟晶岩脉, 其产状与推断伟晶岩异常基本一致, 孔深 181 m, 其中 99.2 m 开始见到伟晶岩脉, 138.4 m

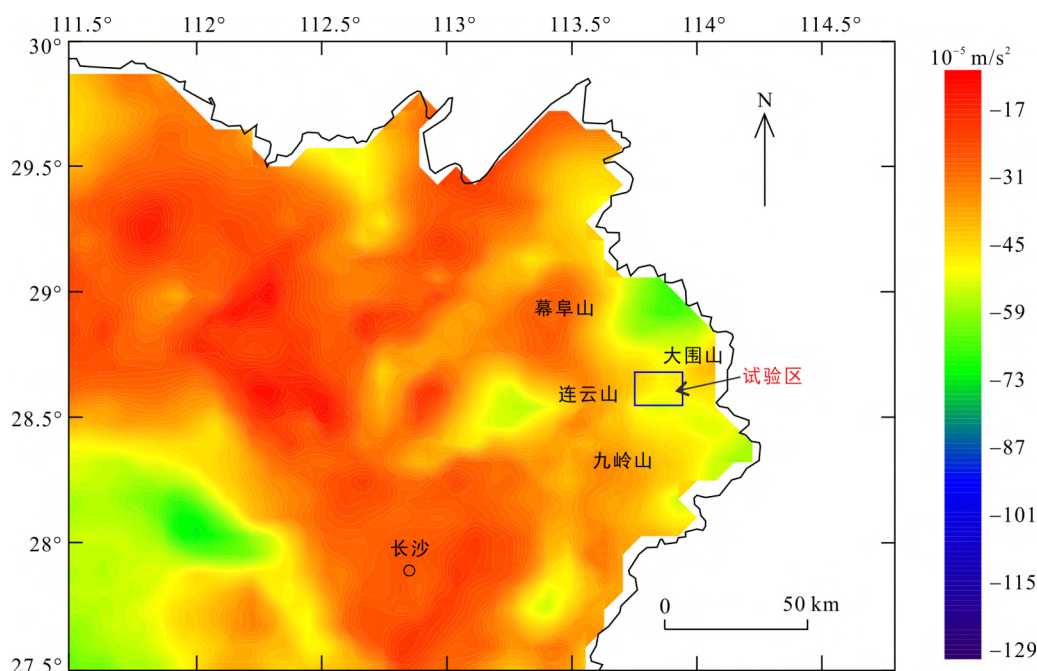


图 3 湘东北区域布格重力异常图

Fig.3 Map showing Bouguer gravity anomaly in the northeastern of Hunan Province

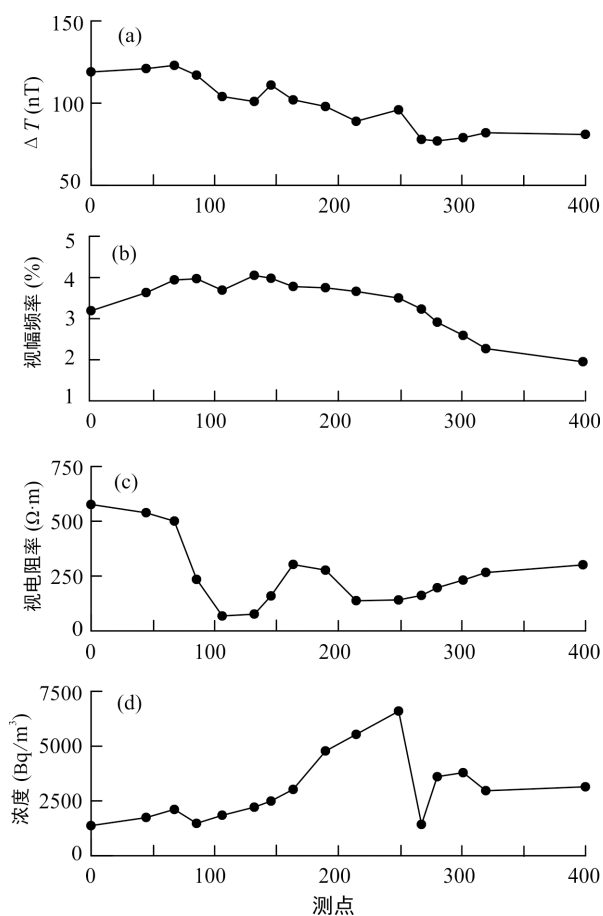


图 4 湘东北试验区磁(a)、电(b、c)、氡气(d)探测结果
Fig.4 Plots showing the magnetic (a), electric (b, c) and radon (d) results of the section in the northeastern experimental area

和 163.6 m 出现两个 Li_2O 品位相对最高的峰值, 其对应品位分别为 0.193% 和 0.206%; 所有样品中有 11 个样品 BeO 在边界品位以上 (0.040%~0.127%), 且有 4 个样品 BeO 含量达工业品位以上, 分别为 0.127%、0.094%、0.083%、0.088%。其中圈定一厚度达 3.0 m、品位为 0.083% 的工业矿体 (表 1)。

2.3 花岗岩型典型矿床——湘南南岭尖峰岭矿区

2.3.1 地质特征

试验区地层发育, 从寒武系-第四系均有分布 (图 6)。其分布由老至新分述如下:

寒武系 (Є): 为类复理石建造的浅变质碎屑岩为主, 夹少量不纯碳酸盐岩, 沉积厚度万余米、构成区内褶皱基底地层。

泥盆系 (D): 上部为黄褐色-灰色薄层粉砂岩、钙质砂岩及砂质页岩; 中部为中-厚层白云质灰岩; 底部为薄层状含大量白云质、燧石条带及团块的灰色灰岩。

石炭系 (C): 其中石磴子组 (C_{1sh}) 在研究区东南部大面积出露, 上部岩性为泥质灰岩和生物碎屑灰岩, 厚度 276~472 m, 下部为灰黑色厚层状夹燧石条带致密灰岩, 与下伏地层呈整合接触。为铷、钨锡、铅锌、萤石、雄黄矿含矿层。孟公坳组 (C_{1m}) 出露在矿区南东角 (西部出露矿界外) 与下伏锡矿山组地层整合接触, 分上、下两段。上段 (C_{1m}^2) 为黄褐色-黑色薄层泥质灰岩, 夹钙质页岩, 厚约 30 m; 下段 (C_{1m}^1) 为中-厚层深灰色白云质灰岩, 多含白云质团块, 局部呈花斑状, 夹有一层杂色含同生沉积角砾的粉砂岩。

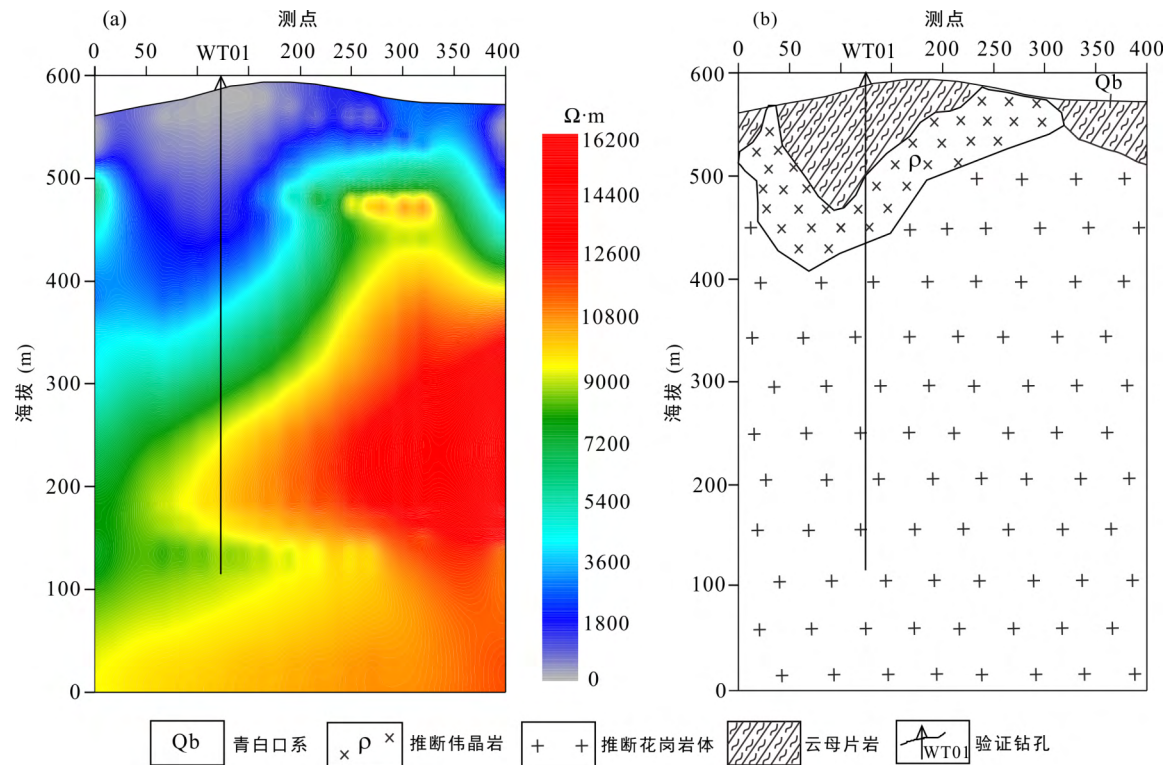


图 5 湘东北试验区 AMT 电磁测深探测结果及综合解释

Fig.5 Maps showing the AMT sounding detection results and interpretation of the section in the northeastern Hunan experimental area

表 1 湘东北试验区 WT01 钻孔岩心测试结果

Table 1 Testing results of the WT01 drilling core in the northeastern Hunan experimental area

样号	自(m)	至(m)	样长(m)	含量(%)							
				Li ₂ O	BeO	Rb ₂ O	SrO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	Cs ₂ O	(Nb, Ta) ₂ O ₅
1	99.2	100.2	1	0.150	0.003	0.053	0.010	0.002	0	0.041	0.002
2	100.2	101.2	1	0.023	0.038	0.101	0.001	0.002	0.001	0.012	0.003
3	101.2	102.5	1.3	0.017	0.051	0.049	0.001	0.004	0.002	0.007	0.005
4	102.5	103.6	1.1	0.039	0.080	0.051	0.001	0.005	0.003	0.010	0.009
5	103.6	104.6	1	0.015	0.047	0.083	0.001	0.003	0.001	0.011	0.004
6	104.6	105.6	1	0.018	0.063	0.071	0	0.003	0.001	0.008	0.004
7	105.6	106.6	1	0.019	0.058	0.081	0	0.003	0.001	0.009	0.003
8	106.6	107.6	1	0.016	0.033	0.067	0.001	0.003	0.001	0.008	0.003
9	107.6	108.6	1.2	0.015	0.048	0.103	0.001	0.004	0.002	0.013	0.005
10	108.6	109.6	1	0.019	0.064	0.080	0.001	0.004	0.001	0.011	0.005
11	109.6	110.6	1	0.018	0.048	0.094	0.001	0.005	0.003	0.013	0.008
12	110.6	111.6	1	0.018	0.050	0.082	0.001	0.004	0.001	0.010	0.005
13	111.6	112.6	1	0.023	0.073	0.074	0.001	0.007	0.003	0.010	0.010
14	112.6	113.6	1	0.023	0.069	0.087	0.001	0.006	0.003	0.012	0.009
15	113.6	114.6	1	0.018	0.060	0.081	0.001	0.005	0.002	0.011	0.007
16	114.6	115.6	1	0.015	0.054	0.073	0.001	0.005	0.002	0.010	0.007
17	115.6	116.6	1	0.017	0.058	0.092	0.001	0.008	0.004	0.012	0.012
18	116.6	117.6	1	0.012	0.061	0.096	0.001	0.003	0.002	0.012	0.005
19	117.6	118.6	1	0.013	0.039	0.144	0.001	0.004	0.001	0.016	0.005
20	118.6	119.6	1	0.019	0.045	0.107	0.001	0.003	0.001	0.012	0.004

续表 1:

样号	自(m)	至(m)	样长(m)	含量(%)							
				Li ₂ O	BeO	Rb ₂ O	SrO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	Cs ₂ O	(Nb, Ta) ₂ O ₅
21	119.6	120.6	1	0.018	0.037	0.072	0.001	0.003	0.001	0.009	0.005
22	120.6	121.6	1	0.013	0.040	0.053	0.001	0.003	0.001	0.007	0.004
23	121.6	122.6	1	0.013	0.041	0.094	0.001	0.003	0.001	0.011	0.003
24	122.6	123.6	1	0.016	0.044	0.107	0.001	0.004	0.001	0.013	0.005
25	123.6	124.6	1	0.018	0.079	0.083	0.001	0.004	0.001	0.011	0.005
26	124.6	125.6	1	0.014	0.052	0.098	0.001	0.003	0.001	0.012	0.004
27	125.6	126.6	1	0.024	0.068	0.166	0.001	0.006	0.004	0.018	0.01
28	126.6	127.6	1	0.015	0.050	0.095	0.001	0.003	0.002	0.012	0.005
29	127.6	128.6	1	0.021	0.065	0.048	0.001	0.004	0.001	0.008	0.005
30	128.6	129.6	1	0.02	0.051	0.059	0.001	0.003	0.001	0.008	0.004
31	129.6	130.6	1	0.014	0.036	0.137	0	0.005	0.003	0.015	0.008
32	130.6	131.6	1	0.035	0.074	0.071	0	0.006	0.002	0.011	0.008
33	131.6	132.5	0.9	0.031	0.064	0.061	0.001	0.004	0.002	0.011	0.006
34	132.5	133.6	1.1	0.023	0.031	0.110	0.001	0.006	0.004	0.015	0.01
35	133.6	134.6	1	0.047	0.095	0.065	0.001	0.005	0.003	0.012	0.008
36	134.6	135.6	1	0.026	0.068	0.066	0.001	0.007	0.005	0.010	0.012
37	135.6	136.6	1	0.031	0.063	0.144	0.001	0.004	0.001	0.017	0.006
38	136.6	137.6	1	0.019	0.069	0.060	0.001	0.007	0.005	0.009	0.012
39	137.6	138.4	0.8	0.016	0.072	0.029	0.002	0.004	0.002	0.005	0.006
40	138.4	139.4	1	0.193	0.005	0.054	0.007	0.002	0	0.039	0.002
41	156.75	157.75	1	0.09	0.002	0.021	0.007	0.002	0	0.003	0.002
42	157.75	158.9	1.15	0.014	0.127	0.027	0.002	0.004	0.001	0.006	0.005
43	158.9	159.9	1.3	0.155	0.004	0.038	0.009	0.002	0	0.019	0.003
44	163.6	164.6	1	0.206	0.003	0.057	0.011	0.002	0	0.048	0.002
45	164.6	165.6	1	0.015	0.049	0.023	0.002	0.003	0.001	0.005	0.005
46	165.6	166.7	1.1	0.026	0.075	0.041	0.002	0.003	0.001	0.008	0.005
47	166.7	167.7	1	0.02	0.094	0.072	0.001	0.003	0.001	0.012	0.003
48	167.7	168.7	1	0.014	0.083	0.037	0.001	0.002	0.001	0.007	0.003
49	168.7	169.35	0.65	0.012	0.088	0.046	0.001	0.004	0.002	0.008	0.005
50	169.35	170.35	1	0.014	0.072	0.067	0.001	0.002	0.001	0.010	0.003
51	170.35	171.35	1	0.013	0.040	0.109	0.001	0.001	0.001	0.014	0.002
52	171.35	172.35	1	0.006	0.025	0.120	0.001	0	0	0.013	0.001
53	172.35	173.35	1	0.013	0.038	0.119	0.001	0.002	0.001	0.014	0.003
54	173.35	174.35	1	0.017	0.041	0.100	0.001	0.002	0.001	0.011	0.004
55	174.35	175.35	1	0.02	0.036	0.122	0.001	0.003	0.001	0.015	0.004
56	175.35	176.35	1	0.027	0.060	0.102	0.001	0.003	0.001	0.013	0.003
57	176.35	177.35	1	0.025	0.050	0.131	0.001	0.003	0.001	0.017	0.004
58	177.35	178.35	1	0.041	0.035	0.127	0.002	0.004	0.001	0.019	0.005
59	178.35	179.35	1	0.037	0.007	0.107	0.002	0.004	0.001	0.016	0.005
60	179.35	180	0.65	0.045	0.039	0.052	0.002	0.005	0.001	0.012	0.006
61	180	181	1	0.123	0.006	0.051	0.042	0.003	0.001	0.042	0.003

注: 数据来源于文春华等(2018b)。

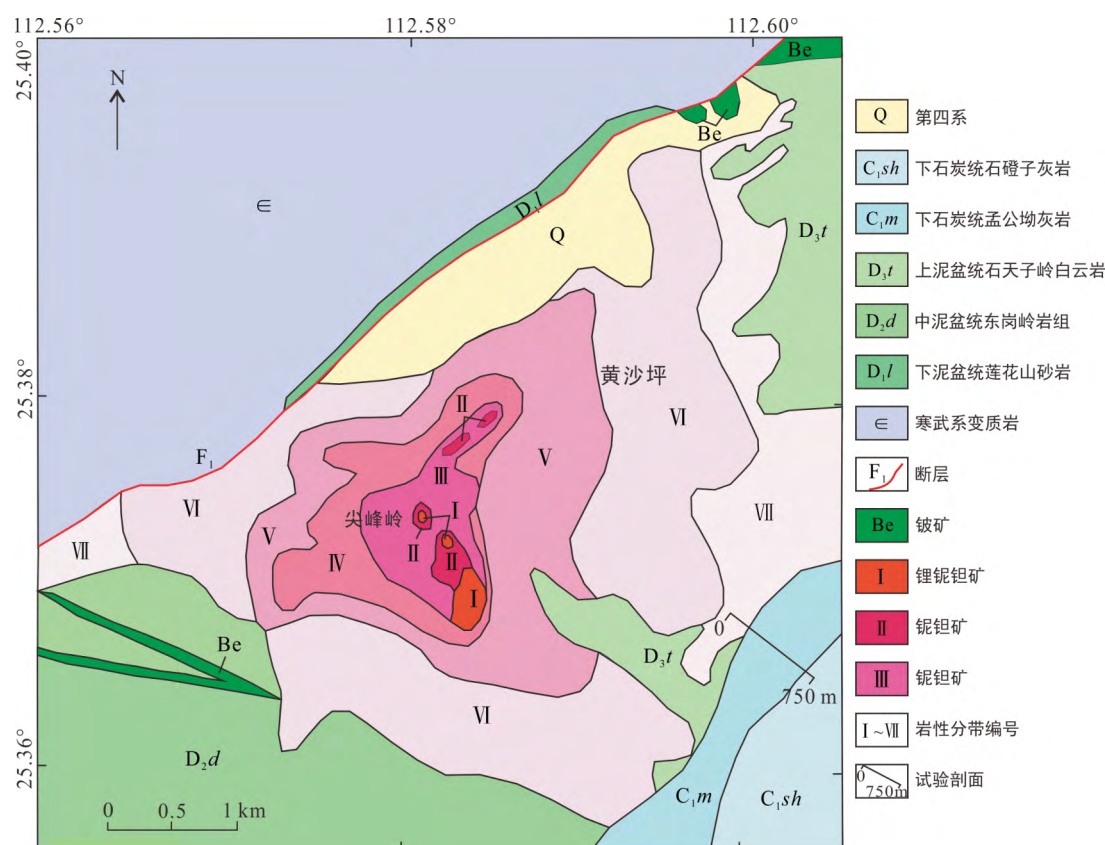


图 6 湘南试验区地质简图及试验剖面示意图(据文春华等, 2017)

Fig.6 Geological map of the southern Hunan experimental area showing the location of the measured section

二叠系(P): 主要为硅质岩、硅质灰岩, 与下伏地层呈断层接触。多呈条带状分布, 厚度>50 m。

第四系(Q): 沿南北向河床小面积分布, 为冲积层。

尖峰岭岩体出露于杉木溪矿区外西缘, 属燕山早中期侵入产物。花岗岩沿断裂侵入于泥盆系, 在平面上呈近等三角形岩株展布, 接触面南缓而北东陡。

2.3.2 矿体特征

探明铌钽矿床分布于尖峰岭岩体顶部云英岩、钠长石花岗岩中, 形态呈等腰三角形, 主要矿石矿物为细晶石、钽铌铁矿, 呈浸染状分布。矿石中除含铌、钽外, 还有锂、铷、铯等。

2.3.3 地球物理响应特征

与湘东北试验区类似, 本地区完成了区域重力资料的再处理, 利用激电中间梯度法、高精度磁测、氦气探测和音频大地电磁测深进行了野外探测试验, 其中重力资料利用的是全省 1:20 万已有成果, 现场试验中的剖面法试验各种方法的点距均为 20 m, 剖面总长度为 500 m。音频大地电磁测深法完成 750 m 长的剖面。

在布格重力异常图中(图 7), 重力异常值范围变化相对较小。湘南南部存在 3 条 NW 向常德-安仁、

邵阳-郴州、新宁-蓝山断裂(柏道远等, 2018)和 5 条 NE 向永州-株洲、宁远-醴陵、蓝山-茶陵、长城岭-炎陵、桂东-汝城断裂交汇, 经过武陵、雪峰、印支、燕山等地质运动, 在这些构造和重力梯级变化带是成矿的有利部位, 对于稀有金属, 本区中的骑田岭和香花岭、柿竹园和瑶南仙重力异常都呈哑铃状分布, 是较好的成矿靶区。

试验剖面高精度磁测结果(图 8a)显示, 整体上的磁异常峰值没有湘南地区高, 侧面证实了湘东北的地质运动没有湘南地区那么活跃和复杂, 150 号测点前的 ΔT 值都>10 nT, 150 号测点后的 ΔT 值<10 nT, 高值反应的是深部岩体的上升, 低值证实隐伏岩体在大号点深部逐渐趋于平缓。图 8b 和图 8c 是以激电中间梯度法在地表所测的响应数据, 整条剖面的视幅频率基本都>4%(图 8b), 认为探测剖面整体上处于成矿的顶部, 推断存在热液硫化物, 在灰岩中存在一些矿化现象, 视电阻率在 200 号测点附近存在极小值, 经地表调查认为是河沟地带充水较多所致。氦气放射性探测可以有效的判断异常的顶部位置(图 8d), 其断裂顶部位置大致在 50 号测点附近, 峰值达 22451.24 Bq/m³, 依据 150 号测点后的数据

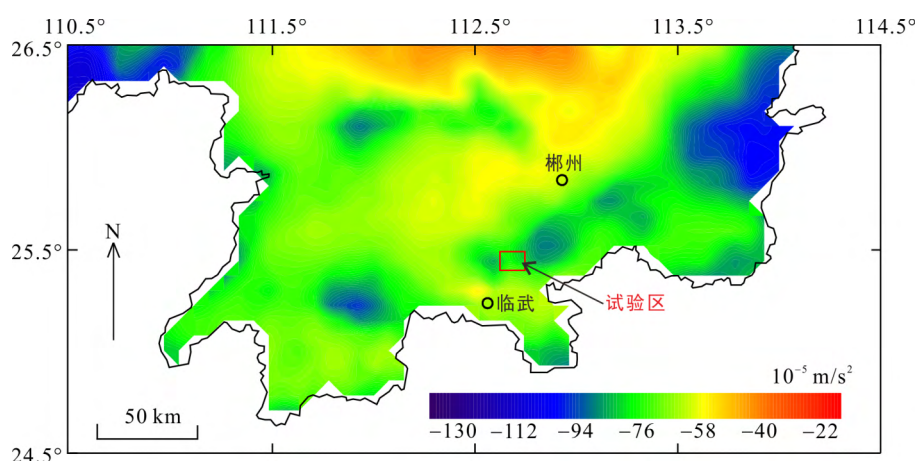


图7 湘南区域布格重力异常图

Fig.7 Gravity anomalies in the southern Hunan province

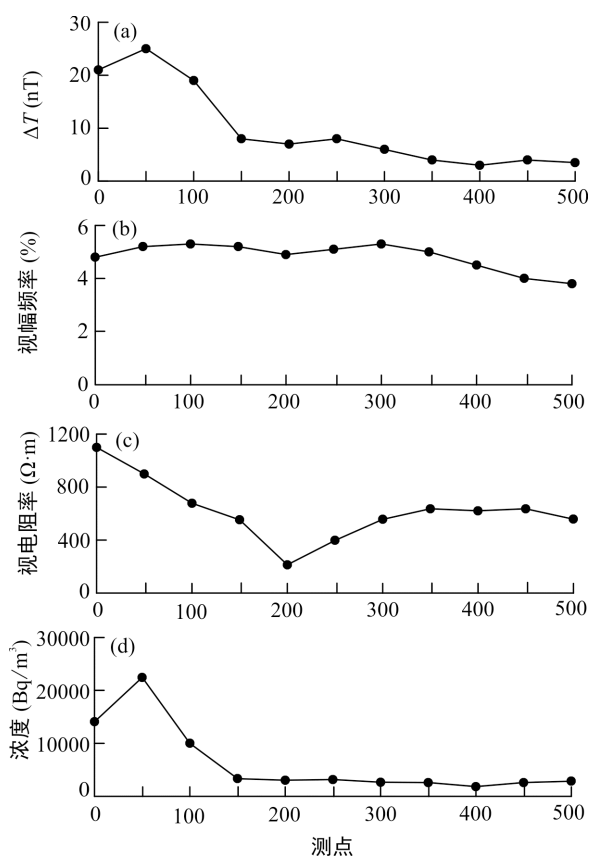


图8 湘南试验区磁(a)、电(b、c)、氡气(d)探测结果

Fig.8 Plots of the magnetic (a), electric (b, c) and radon (d) results for the measured section in the southern Hunan experimental area

求得均值(认为为背景值)2766.5 Bq/m³, 峰值是背景值的 8.1 倍, 相比湘东北探测结果 2.5 倍来看, 湘南地区的构造活动性远远强于湘东北地区, 表明控矿活动和容矿空间亦强于湘东北地区。

音频大地电磁测深剖面(图 9a)显示, 浅部电阻率较低, 通常<2500 Ω·m, 深部电阻率较大, 最大值

>10000 Ω·m, 两者中间呈过渡形态, 且小号点高电阻埋深较浅, 而大号点逐步变深且随着点号增加等值线趋于平缓。结合图 7 和图 8, 推断低阻为石炭系灰岩、高阻为香花岭岩体深部延伸的岩株或岩体, 在似向斜及岩体顶部推断为伟晶岩目标体。电阻率清晰的分辨了隐伏岩体的顶部及异常目标体的产状(图 9b)。

2.3.4 钻探验证

本条综合剖面实施了 WT02 和 WT03 两个钻孔, 其中 WT02 孔深 421.94 m, 浅部均为石炭系灰岩, 337.05 m 开始见到矽卡岩化, 401.77 m 见到花岗岩体, 通过化验测试结果来看, 在矽卡岩化和岩体接触带附近 Rb 的品位最高, Rb₂O 达 0.266%, 沿深部 Rb₂O 品位具有一定的连续性, 在 0.167% 左右徘徊; WT03 孔深 761.67 m, 浅部也均为灰岩, 655.47 m 开始见到矽卡岩化, 689.67 m 见到花岗岩, 矽卡岩化和岩体接触带附近 Rb 的品位最高, Rb₂O 达 0.155%, 深部品位在 0.112% 附近徘徊, 钻孔最深处的品位为 0.044%。两个钻孔综合来看, 距离岩体越近, 稀有金属的品位越高, 在深度上岩性接触带(矽卡岩化带)处品位明显高于岩体内, 且越深品位越低(但若深部存在其他地质构造和控矿因素也应有所变化)。

3 认识与探讨

3.1 认识

(1) 综合分析可知“重力低、磁力高”是花岗岩型稀有金属聚集异常区的典型区域地球物理找矿标志。局部出现低电阻率和高幅频率特征为隐伏稀有金属矿床顶部产出相关热液蚀变岩的反应, 也可作为间接推断成矿异常的标志。

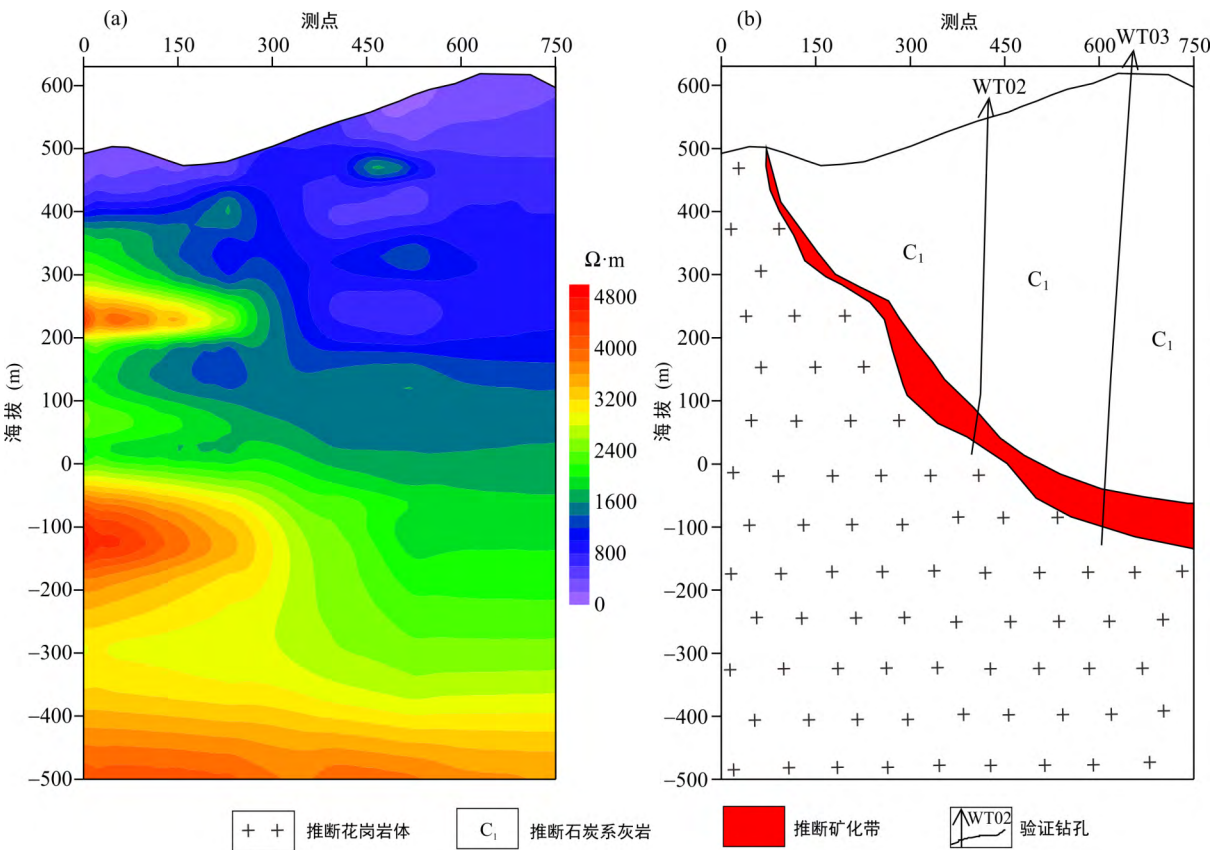


图 9 湘南试验区 AMT 电磁测深探测结果及综合解释

Fig.9 Maps showing the AMT sounding detection results and interpretation of the measured section in the southern Hunan experimental area

表 2 湘南试验区 WT02 钻孔岩心测试结果

Table 2 Testing results of WT02 drilling core in the southern Hunan experimental area

采样编号	自(m)	至(m)	样长(m)	含量(%)							
				Rb ₂ O	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	Ag	CaF ₂	Cu	Sn	WO ₃
1	283.76	284.71	0.95	-	-	-	1.47	-	-	0.018	0.023
2	284.71	285.21	0.5	-	-	-	2.17	-	-	0.011	0.003
3	301.74	302.74	1	-	-	-	3.48	-	-	0.002	0.025
4	337.05	338.05	0.95	-	-	-	3.82	6.92	-	0.022	0.003
5	339.26	340.12	0.82	0.033	-	-	-	-	-	-	-
6	340.12	340.38	0.26	0.103	-	-	2.40	-	-	0.013	0.011
7	340.38	341.38	1	0.028	-	-	3.61	6.72	-	0.011	0.006
8	341.38	342.38	1	-	-	-	3.62	-	-	0.023	0.005
9	342.38	343.38	1	-	-	-	3.59	-	-	0.029	0.006
10	343.38	344.38	0.99	-	-	-	2.60	-	-	0.012	0.005
11	344.38	345.38	0.98	-	-	-	2.71	-	-	0.008	0.005
12	345.38	346.3	0.9	-	-	-	3.80	-	-	0.011	0.006
13	346.3	347.35	0.95	-	-	-	3.88	-	-	0.019	0.006
14	347.35	348.42	1	-	-	-	4.22	-	-	0.01	0.005
15	348.42	349.58	1.11	-	-	-	4.88	-	-	0.022	0.007
16	349.58	350.8	1.17	-	-	-	3.82	-	-	0.026	0.006
17	350.8	351.8	1	-	-	-	2.81	5.68	-	0.015	0.004

续表 2:

采样编号	自(m)	至(m)	样长(m)	含量(%)							
				Rb ₂ O	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	Ag	CaF ₂	Cu	Sn	WO ₃
18	351.8	352.8	0.99	-	-	-	4.44	-	-	0.013	0.005
19	352.8	353.8	0.99	-	-	-	6.90	-	-	0.013	0.007
20	353.8	354.83	1.03	-	-	-	4.40	-	-	0.023	0.006
21	358.22	358.92	0.7	-	-	-	3.56	5.66	-	0.008	0.004
22	358.92	360.12	1.19	-	-	-	2.51	-	-	0.007	0.008
23	360.12	361.51	1.39	-	-	-	3.24	-	-	0.008	0.009
24	399.74	400.74	1	-	-	-	6.42	1.22	0.01	0.002	0.005
25	400.74	401.09	0.34	0.041	-	-	5.50	-	0.12	0.136	0.011
26	401.09	401.77	0.66	0.195	0.012	0.001	1.55	-	0.01	0.002	0.078
27	401.77	402.77	1	0.266	0.026	0.002	-	-	-	-	0.039
28	402.77	403.77	1	0.203	0.001	-	-	-	-	-	-
29	403.77	404.77	1	0.197	0.001	-	-	-	-	-	-
30	404.77	405.77	0.99	0.188	0.008	-	-	-	-	-	-
31	405.77	406.77	0.99	0.186	0.002	-	-	-	-	-	-
32	406.77	407.77	0.99	0.182	-	-	-	-	-	-	-
33	407.77	408.77	1	0.181	-	-	-	-	-	-	-
34	408.77	409.52	0.75	0.169	-	-	-	-	-	-	-
35	409.52	410.92	1.2	0.162	-	-	-	-	-	-	-
36	410.92	411.92	0.98	0.175	-	-	-	-	-	-	-
37	411.92	412.92	0.98	0.167	-	-	-	-	-	-	-
38	412.92	413.92	0.98	0.167	-	-	-	-	-	-	-
39	413.92	414.92	0.97	0.16	-	-	-	-	-	-	-
40	414.92	415.92	0.97	0.171	-	-	-	-	-	-	-
41	415.92	416.92	0.97	0.163	-	-	-	-	-	-	-
42	416.92	417.92	0.97	0.158	-	-	-	-	-	-	-
43	417.92	418.92	0.97	0.167	-	-	-	-	-	-	-
44	418.92	419.93	0.98	0.153	-	-	-	-	-	-	-
45	419.93	420.93	0.95	0.166	-	-	-	-	-	-	-

注: 数据来源于李祥辉等(2017); “-” 表示分析值低于检测限。

表 3 湘南试验区 WT03 钻孔岩心测试结果

Table 3 Testing results of WT03 drilling core in the southern Hunan experimental area

采样编号	自(m)	至(m)	样长(m)	含量(%)				
				Rb ₂ O	Sn	WO ₃	Zn	Pb
1	655.47	655.87	0.4	-	0.005	0.002	0.05	-
2	662.87	663.72	0.85	0.002	0.038	0.003	-	-
3	665.32	666.32	1	-	-	-	0.01	0.01
4	666.32	666.57	0.25	-	0.080	-	1.64	1.24
5	666.57	667.57	1	-	-	-	0.01	0.02
6	676.72	677.17	0.45	-	0.016	0.001	0.05	-
7	681.6	682.6	1	0.011	0.007	-	-	-
8	682.6	683.6	1	0.090	0.144	0.009	0.03	0.01
9	683.6	684.63	1.03	0.089	0.166	0.023	0.04	0.01
10	684.63	685.63	0.9	0.099	-	0.030	-	-
11	685.63	686.63	0.9	0.155	-	0.043	-	-

续表 3:

采样编号	自(m)	至(m)	样长(m)	含量(%)				
				Rb ₂ O	Sn	WO ₃	Zn	Pb
12	686.63	687.67	1	0.150	-	0.041	-	-
13	687.67	688.67	1	0.153	-	0.049	-	-
14	688.67	689.67	1	0.152	-	0.043	-	-
15	689.67	690.67	1	0.148	-	-	-	-
16	690.67	691.67	1	0.142	-	-	-	-
17	691.67	692.67	1	0.130	-	-	-	-
18	692.67	693.67	1	0.137	-	-	-	-
19	693.67	694.67	1	0.146	-	-	-	-
20	694.67	695.67	1	0.135	-	-	-	-
21	695.67	696.67	1	0.151	-	-	-	-
22	696.67	697.87	1.2	0.141	-	-	-	-
23	697.87	699.07	1.2	0.139	-	-	-	-
24	699.07	700.17	1.1	0.146	-	-	-	-
25	700.17	701.17	1	0.140	-	-	-	-
26	701.17	702.17	1	0.162	-	-	-	-
27	702.17	703.19	1	0.156	-	-	-	-
28	703.19	704.29	1	0.145	-	-	-	-
29	704.29	705.39	1	0.140	-	-	-	-
30	705.39	706.65	1.26	0.161	-	-	-	-
31	706.65	707.92	1.27	0.139	-	0.038	0.3	-
32	707.92	708.59	0.67	0.153	-	-	-	-
33	708.59	709.89	1.3	0.147	-	-	-	-
34	709.89	710.89	1	0.144	-	-	-	-
35	710.89	711.89	1	0.136	-	-	-	-
36	711.89	712.89	1	0.139	-	-	-	-
37	712.89	713.69	0.8	0.127	-	-	-	-
38	713.69	714.69	1	0.117	-	-	-	-
39	714.69	715.69	1	0.107	-	-	-	-
40	715.69	716.69	1	0.110	-	-	-	-
41	716.69	717.59	0.9	0.105	-	-	-	-
42	717.59	718.79	1.2	0.108	-	-	-	-
43	718.79	719.99	1.2	0.132	-	-	-	-
44	719.99	721.19	1.2	0.134	-	-	-	-
45	721.19	722.19	1	0.131	-	-	-	-
46	722.19	723.19	1	0.139	-	-	-	-
47	723.19	724.09	0.9	0.138	-	-	-	-
48	724.09	724.89	0.76	0.140	-	-	-	-
49	724.89	725.99	1.1	0.140	-	-	-	-
50	725.99	727.09	1.1	0.136	-	-	-	-
51	727.09	728.19	1.1	0.136	-	-	-	-
52	728.19	729.19	1	0.152	-	-	-	-
53	729.19	730.19	1	0.135	-	-	-	-
54	730.19	731.19	1	0.133	-	-	-	-
55	731.19	732.19	1	0.141	-	-	-	-
56	732.19	733.39	1.2	0.129	-	-	-	-

续表 3:

采样编号	自(m)	至(m)	样长(m)	含量(%)				
				Rb ₂ O	Sn	WO ₃	Zn	Pb
57	733.39	734.59	1.2	0.129	-	-	-	-
58	734.59	735.59	1	0.121	-	-	-	-
59	735.59	736.79	1.2	0.122	-	-	-	-
60	736.79	737.99	1.2	0.130	-	-	-	-
61	737.99	739.19	1.2	0.140	-	-	-	-
62	739.19	740.19	1	0.137	-	-	-	-
63	740.19	741.19	1	0.130	-	-	-	-
64	741.19	742.19	1	0.131	-	-	-	-
65	742.19	743.19	1	0.126	-	-	-	-
66	743.19	744.19	1	0.129	-	-	-	-
67	744.19	745.19	1	0.129	-	-	-	-
68	745.19	746.19	1	0.134	-	-	-	-
69	746.19	746.84	0.65	0.137	-	-	-	-
70	746.84	747.24	0.4	0.206	0.013	0.021	0.06	-
71	747.24	748.44	1.2	0.147	-	-	-	-
72	748.44	749.69	1.25	0.151	-	-	-	-
73	749.69	750.69	1	0.145	-	-	-	-
74	750.69	751.69	1	0.150	-	-	-	-
75	751.69	752.69	1	0.152	-	-	-	-
76	752.69	753.59	0.9	0.142	-	-	-	-
77	753.59	754.54	0.95	0.144	-	-	-	-
78	754.54	755.49	0.95	0.108	-	-	-	-
79	755.49	756.49	1	0.104	-	-	-	-
80	756.49	757.49	1	0.101	-	0.031	-	-
81	757.49	758.49	1	0.096	-	0.029	-	-
82	758.49	759.49	1	0.098	-	0.030	-	-
83	759.49	760.57	1.08	0.125	-	0.029	-	-
84	760.57	761.67	1.1	0.044	0.004	0.003	-	-

注：数据来源于李祥辉等(2017);“-”为表示分析值低于检测限。

(2) 区域地层结构是成矿基本条件,在此基础上利用已知地质调查成果建立地质成矿模型,受局部有利成矿因素(如小岩株、岩体接触带或构造交叉部位等)控制,最终圈定重要的稀有金属成矿部位为花岗岩顶部和边缘接触带。利用地球物理方法探测关键部位是物探方法探测的直接目标,通过这些直接目标来进行间接找矿。在此基础上,建立地球物理模型,研究分析物性特征、利用区域重力+激电+电磁测深的综合物探方法组合来探测研究区地层岩石响应,从而进行成矿预测。

(3) 音频大地电磁法可以在垂向上较深的反映隐伏岩体的顶部和边缘(外)接触带,在湘东北和湘南探测效果明显,可以作为有效的深部探测隐伏稀有金属矿床有效手段。

(4) 氦气放射性探测表明,放射性探测对构造露头的探测具有明显的指示作用。通过横向对比研究,湘东北的峰值和湘南地区的峰值比为 1 : 3,间接说明湘南地区的地质运动相比湘东北较为复杂,也更有利于成矿。这一点在所测试验剖面激发极化法探测结果中也有所指示,湘南的视幅频率峰值为 5.3%、背景值为 4.8%,而湘东北为 4.1%、背景值为 3.7%,说明湘南地区的岩石地层热液活动强于湘东北地区。

(5) 激发极化法对稀有金属的探测直接指示性效果不明显,局部出现低电阻高极化现象反应的是成矿系列中的有关浅部硫化物激发极化效应。稀有金属矿地球物理探测有效方法组合初步认为是:重力低、磁力高、电阻高。在此基础上结合当地地质

地球物理特征来分析研究异常体的分布特征。

3.2 探 讨

(1) 任何地球物理方法的使用都要因地制宜,地质成矿条件是其背景,南岭地区稀有金属成矿带两种类型的矿床都与隐伏岩体有关,通过小比例尺的地质调查研究结果选定异常靶区后,针对性的选择地球物理方法可以有效地、快速地对成矿情况进行较为精细的评价。在充分了解找矿靶区的成矿模型、找矿标志基础上,合理的利用地球物理方法组合,抓住具体矿区内的成矿蚀变信息(黄铁矿化等硫化矿物组合则用激发极化参数圈定浅部信息)、成矿物质来源(热液来源的致矿信息则利用高精度磁测圈定热液矿化强度信息)、成矿岩体特征(利用重力和电磁测深综合圈定成矿岩体的空间展布特征)、成矿活跃性(氦气探测的异常值大小和幅值范围、跳变信息来判定)来综合有效的评价和预测。

(2) 湖南省的稀有金属矿床大部分属于伴生矿床,可以通过伴生矿物引起的地球物理异常来进行间接找矿。

(3) 通过研究区重力布格异常结果,认为在近似对称哑铃状(如湘东北的幕阜山岩体闭合异常和连云山岩体闭合异常、湘南地区香花岭岩体闭合异常和骑田岭岩体闭合异常)的把手部位是潜在稀有金属成矿靶区,可作为大型稀有金属资源基地备选地;且根据氦气放射性探测结果认为湘南地区是湖南最大的稀有金属成矿潜力区。

致谢: 本文从构思到成文历时两年多,期间得到了很多专家的指点,在此表示感谢。衷心感谢吉林大学李桐林教授和中南大学柳建新教授对本文仔细审查,并提出宝贵的修改意见。同时感谢挪威科技大学郭振威博士对本文英文摘要的润色修改,让作者受益良多。

参考文献(References):

- 柏道远,李银敏,钟响,李彬,黄乐清,伍贵华,李超,姜文. 2018. 湖南NW向常德-安仁断裂的地质特征、活动历史及构造性质. 地球科学, 43(7): 2496-2517.
- 曹创华,柳建新,童孝忠,严发宝. 2015. 东昆仑成矿带典型矿山(磁)响应特征及成矿模式识别应用研究. 长沙: 中南大学出版社: 18-87.
- 陈希泉,陈颢,罗先熔,欧阳菲,文美兰. 2011. 地气(氦气)测量方法寻找隐伏含矿断裂试验. 物探与化探, 35(6): 817-820.
- 陈毓川,裴荣富,张宏良. 1990. 南岭地区与中生代花岗

岩类有关的有色、稀有金属矿床地质. 地球学报, 11(1): 79-85.

- 杜发,张秀萍,毛立全,胥溢,张波. 2018. 航磁在阿尔金东段铌钽稀有金属找矿中的应用. 物探与化探, 42(5): 902-908.
- 付小方,侯立玮,王登红,袁茜平,梁斌,郝雪峰,潘蒙. 2014. 四川甘孜甲基卡锂辉石矿矿产调查评价成果. 中国地质调查, 1(3): 37-43.
- 何继善. 2006. 双频激电法. 北京: 高等教育出版社: 1-7.
- 胡忠德. 2008. 可可托海稀有金属矿床3号脉地质特征及深部找矿方向. 新疆有色金属, 31(S2): 7-10.
- 湖南省地质调查院. 2017. 中国区域地质志湖南志. 北京: 地质出版社: 579-622, 913-1037.
- 黄定堂. 2003. 灵山岩体演化特征及其与稀有金属的成矿关系. 地质与勘探, 39(4): 3-40.
- 黄韬,付小方,杨荣,范俊波. 2018. 探地雷达在甲基卡稀有金属矿田找矿的应用. 物探与化探, 42(2): 316-324.
- 冷双梁,谭超,黄景孟,周豹. 2018. 幕阜山花岗岩地区稀有金属成矿规律初探. 资源环境与工程, 32(3): 351-357.
- 李祥辉,朱真真,杨文翔,匡巨,龙文涛,刘晓曦,李明领,陈洪治,何永帅,黄小波,覃孝明,宁尚军. 2017. 湖南省临武县杉木溪矿区钨多金属矿普查报告. 郴州: 湖南省有色地质勘查局一总队: 1-85.
- 李应清. 2017. 综合物探方法在伟晶岩矿区的应用. 新疆有色金属, 40(1): 29-31.
- 刘怀胜. 2018. 新疆伟晶岩型稀有金属矿地球化学特征及找矿标志. 世界有色金属, 18(9): 65-67.
- 刘翔,周芳春,黄志彪,李建康,周厚祥,肖国强,包云河,李鹏,谭黎明,石威科,苏俊男,黄小强,陈虎,汪宣民,林跃,刘晓敏. 2018. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型铌钽多金属矿床的发现及其意义. 大地构造与成矿学, 42(2): 235-243.
- 沈晓明,罗先熔. 2013. 氦气测量在云南木利铋矿三号背斜寻找隐伏断裂中的应用. 现代地质, 27(4): 799-808.
- 王登红,王瑞江,李建康,赵芝,于扬,代晶晶,陈郑辉,李德先,屈文俊,邓茂春,付小方,孙艳,郑国栋. 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述. 中国地质, 40(2): 361-371.
- 王登红,王瑞江,孙艳,李建康,赵芝,赵汀,屈文俊,付小方,江善元,黄华谷,冯文杰,徐平,李胜苗,黄新鹏,周辉,朱永新,涂其军,李新仁,方一平,周园园. 2016. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述. 地球学报, 37(5): 569-580.

- 王伟, 潘蒙, 袁蔺平, 付小方. 2018. 川西甲基卡稀有金属矿集区伟晶岩脉矿化统计特征及地质找矿意义. 山东国土资源, 34(4): 37–43.
- 文春华, 陈剑锋, 林碧海, 罗小亚. 2018a. 湖南重点矿集区稀有金属调查评价2018年实施方案. 长沙: 湖南省地质调查院: 1–55.
- 文春华, 陈剑锋, 罗小亚. 2018b. 湖南重点矿集区稀有金属调查评价成果报告. 长沙: 湖南省地质调查院: 1–124.
- 文春华, 邵拥军, 黄革非, 罗小亚, 李胜苗. 2017. 湖南尖峰岭稀有金属花岗岩地球化学特征及成矿作用. 矿床地质, 36(4): 879–892.
- 姚锦其, 赵友方. 2009. 氦气测量在栗木锡铌钽矿外围的找矿效果. 物探与化探, 33(3): 286–289.
- 袁忠信, 白鸽. 2001. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布. 矿床地质, 20(4): 347–354.
- 张玲, 梁磊. 2018. 伟晶岩与细晶岩的成因——以广西栗木稀有金属花岗岩地区为例. 桂林理工大学学报, 38(2): 175–188.
- 张玲, 林德松. 2004. 我国稀有金属资源现状分析. 地质与勘探, 40(1): 26–30.
- 周振华, 车合伟, 马星华, 高旭. 2016. 初论稀有金属矿床研究的一些重要进展. 地质与勘探, 52(4): 614–626.
- 《中国矿床发现史·四川卷》编委会. 1996. 中国矿床发现史·四川卷. 北京: 地质出版社: 223–224.
- Ahmad A, Gholam H N, Ali Moradzadeh and Mohammad A R. 2018. Application of magnetic and gravity methods to the exploration of sodium sulfate deposits, case study: Garmab mine, Semnan, Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 159: 586–596.
- An S L, Zhou K F, Wang J L, Yang H and Zhang Z X. 2018. Integrated analysis of gravity and magnetic fields in the Eastern Tianshan Belt, Xinjiang, Central Asia: Implications for Cu-Au-Fe polymetallic deposits exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 159: 319–328.
- Cagniard L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric methods of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18(3): 605–635.
- Chen G X, Liu T Y, Sun J S, Cheng Q M, Sahoo B, Zhang Z J and Zhang H L. 2015. Gravity method for investigating the geological structures associated with W-Sn polymetallic deposits in the Nanling Range, China. *Journal of Applied Geophysics*, 120: 14–25.
- Eberle D G, Daudi E X F, Muiuane E A, Nyabeze P and Pontavida A M. 2012. Crisp clustering of airborne geophysical data from the Alto Ligonha pegmatite field, northeastern Mozambique, to predict zones of increased rare earth element potential. *Journal of African Earth Sciences*, 62: 26–34.
- Farquharson C G and Oldenburg D W. 2004. A comparison of automatic technique for estimating the regularization parameter in non-linear inverse problems. *Geophysical Journal International*, 156(3): 411–425.
- Guo N X, Zhao Z, Gao J F, Chen W, Wang D H and Chen Y C. 2018. Magmatic evolution and W-Sn-U-Nb-Ta mineralization of the Mesozoic Jiulongnao granitic complex, Nanling Range, South China. *Ore Geology Reviews*, 94: 414–434.
- Iraj V N and Tang J T. 2004. Dual-frequency IP over Tanghuping Prospect. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 14(4): 829–832.
- Lee S K, Kin H J, Song Y H and Lee C K. 2009. MT2DInvMatlab — A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion. *Computers & Geosciences*, 35(8): 1722–1734.
- Murtazaev K H, Abdullaev I G, Abduvaliev A, Bezzubov N I, Perelygin V P, Roustamova M and Tajiboev R. 1997. The determination of the quantity of radon gas in the radioactive deposit areas. *Radiation Measurements*, 28(1–6): 717–719.
- Strack K M. 2014. Future directions of electromagnetic methods for hydrocarbon applications. *Surveys in Geophysics*, 35: 157–177.
- Wang D H, Zhao Z, Yu Y, Dai J J, Deng M C, Zhao T and Liu L J. 2018. Exploration and research progress on ion-adsorption type REE deposit in South China. *China Geology*, (3): 415–424.
- Xu Z Q, Liang B, Geng Y, Liu T and Wang Q B. 2019. Extraction of soils above concealed lithium deposits for rare metal exploration in Jiajika area: A pilot study. *Applied Geochemistry*, 107: 142–151.

Geophysical Responses of Typical Rare Metal Deposits and Implications on Geophysical Prospecting in Hunan Province, China

CAO Chuanghua^{1, 2, 3, 4}, WEN Chunhua², LOU Fasheng¹, MENG Debao²,
LIU Chunming^{3, 4}, KANG Fangping² and PENG Jie²

(1. *Geology Survey Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330030, Jiangxi, China*; 2. *Geology Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410116, Hunan, China*; 3. *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China*; 4. *Hunan Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China*)

Abstract: In order to sort out effective geophysical methods on rare metal deposit prospecting in Hunan province, we have tested high-precision magnetic, induced polarization, audio electromagnetic and radon radioactivity methods on geophysical prospecting in the southern China. In this paper, we report a case study on the Baishawo and the Jianfengling polymetallic deposits in Hunan province. Measurements were designed according to the geological information and geophysical datasets including gravity, magnetic, electromagnetic and radioactive. Combining multi-geophysical methods, we established a geological-geophysical prospecting model and carried out predictions on the deeply concealed ores. The geophysical predictions are verified by the drilling wells. Finally, we summarized the effective geophysical methods for rare metal deposit prospecting, which can also be useful geophysical prospecting method for areas with similar metallogenic conditions in Hunan province.

Keywords: northeastern Hunan; southern Hunan; rare metal deposits; geophysical exploration methods